

539, 443

Rec'd PCT/PTO 07 APR 2005

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international(43) Date de la publication internationale  
22 avril 2004 (22.04.2004)

PCT

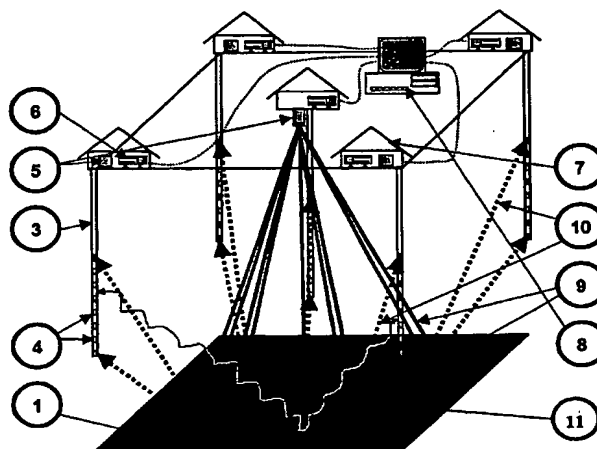
(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/034090 A1

- (51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : G01V 1/28
- (21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR2003/002874
- (22) Date de dépôt international : 1 octobre 2003 (01.10.2003)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité : 02/12494 8 octobre 2002 (08.10.2002) FR
- (71) Déposant (pour BR, CA seulement) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE [FR/FR]; 1 et 4, avenue du Bois Préau, F-92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR).
- (71) Déposant (pour CA seulement) : GAZ DE FRANCE-SERVICE NATIONAL [FR/FR]; 23, rue Philibert Delorme, F-75840 Paris Cedex 17 (FR).
- (71) Déposant (pour CA, MX, NO seulement) : COMPAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE [FR/FR]; 1, rue Léon Migaux, F-91301 Massy Cedex (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : MEUNIER, Julien [FR/FR]; 12, rue de Père Guérin, F-75013 Paris (FR); HUGUET, Frédéric [FR/FR]; 30, rue du Maréchal Foch, F-95470 Fosses (FR).
- (74) Représentant commun : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE; 1 et 4, avenue du Bois Préau, F-92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR).
- (81) États désignés (national) : BR, CA, MX, NO, US.
- (84) États désignés (régional) : brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR SEPARATING MICROSEISMIC SIGNALS FROM SEISMIC SIGNALS EMITTED BY ONE OR SEVERAL SOURCES

(54) Titre : METHODE DE SEPARATION DE SIGNAUX DE MICROSISMICITE DE SIGNAUX SISMIQUES EMIS PAR UNE OU PLUSIEURS SOURCES



(57) Abstract: The invention concerns a method for separating microseismic signals from seismic signals acquired in the context of active seismic monitoring operations of underground zones being exploited. It consists in producing seismic recordings from signals emitted by a single or several seismic sources monitored by signals orthogonal relative to one another. In that case the signals are processed to separate the respective contributions of the seismic sources to the received signals and reconstruct the seismograms equivalent to those which would be obtained by separately actuating the seismic sources. The induced microseismic signals (passive seismics) are separated from the seismic signals derived from sources 5 (active seismics) essentially by isolating the contribution of the latter, by comparison with a reference spectral model to the fundamental frequencies emitted and to their respective harmonics, and by reconstructing in the time domain the induced microseismic signals and the signals derived from the seismic sources 5. The invention is applicable to seismic monitoring of underground hydrocarbon or fluid storage reservoirs.

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/034090 A1

**Publiée :**

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

---

**(57) Abrégé :** Méthode pour séparer des signaux de microsismicité induite de signaux sismiques acquis dans le cadre d'opérations de surveillance sismique active d'une zones souterraines en cours d'exploitation. On forme des enregistrements sismiques à partir de signaux émis par une source sismique unique ou plusieurs sources sismiques pilotées par des signaux orthogonaux les uns relativement aux autres. Dans cette alternative les signaux sont traités pour séparer les contributions respectives des sources sismiques aux signaux reçus et reconstruire les sismogrammes équivalents à ceux que l'on obtiendrait en actionnant séparément les sources sismiques. On sépare les signaux de microsismicité induite (sismique passive) des signaux sismiques émanant des sources 5 (sismique active) essentiellement en isolant la contribution de ces derniers, par comparaison avec un modèle spectral de référence aux fréquences fondamentales émises et à leurs harmoniques respectives, et en reconstituant dans le domaine des temps les signaux de microsismicité induite et les signaux émanant des sources sismiques 5. - Applications à la surveillance sismique de réservoirs souterrains d'hydrocarbures ou de stockage de fluides.

**METHODE DE SEPARATION DE SIGNAUX DE MICROSISMICITE DE**  
5 **SIGNAUX SISMIQUES EMIS PAR UNE OU PLUSIEURS SOURCES**

L'invention concerne une méthode pour discriminer des signaux microsismiques induits par l'exploitation d'un gisement souterrain, parmi des signaux sismiques émis dans le cadre d'opérations de surveillance sismique

10 Pour suivre l'évolution d'un gisement souterrain en cours d'exploitation, il est connu d'implanter à poste fixe des sources sismiques et des récepteurs sismiques, en surface ou dans des puits, qu'il s'agisse de puits d'exploration ou d'exploitation du gisement et de procéder à intervalles de temps fixés à des opérations d'enregistrement des signaux sismiques émanant de la formation. Il peut s'agir de signaux sismiques induits par l'activité  
15 d'exploitation du site ou de signaux sismiques renvoyés par les discontinuités géologiques de la formation, en réponse à l'émission d'ébranlements dans le sol au moyen d'une ou plusieurs sources sismiques. La comparaison des enregistrements effectués à des instants différents de l'exploitation du site, fournit des données sur son évolution.

Différents systèmes de surveillance sismique à long terme sont décrits par exemple  
20 dans les brevets EP 591 037 (US 5 461 594), FR 2 593 292 (US 4 775 009), FR 2 728 973 (US 5 724 311) ou FR 2 775 349.

Par le brevet EP 748.457 (US 5 724 311) de deux des demandeurs, on connaît un système de surveillance permanente permettant d'obtenir une parfaite reproductibilité des conditions opératoires dans des opérations répétitives de surveillance sismique d'une zone  
25 souterraine traversée par au moins un puits ou forage, et notamment d'un réservoir souterrain de stockage de gaz. Ce système comporte, installés à poste fixe, un ou plusieurs ensemble(s) de récepteurs sismiques (enterrés en surface ou placés dans un ou plusieurs puits), plusieurs sources sismiques répétitives (enterrées ou en surface) ainsi que d'un

réseau de liaison permanente pour l'alimentation sélective de ces sources en énergie. Une station centrale télécommande sélectivement chacune de ces sources, et enregistre les signaux sismiques émanant de la zone souterraine en réponse aux ondes sismiques transmises sélectivement dans le sol par les sources.

5 Grâce à cet ensemble de sources à poste fixe dont le couplage avec les terrains environnant reste stable, et à ce réseau d'alimentation au moins en partie enterré et dont l'aire d'emprise en surface est réduite, on peut mener toute une série d'opérations sismiques de surveillance de longue durée dans des conditions opératoires stables, sans risque d'incompatibilité avec les activités du chantier d'exploitation.

10 Par le brevet FR 2.775.349 (US 6 182 012) des deux mêmes demandeurs, on connaît une méthode et un dispositif de surveillance permanente d'une formation souterraine dans laquelle on forme des cavités pour des sources sismiques (de préférence assez profondes pour qu'elles soient couplées avec la formation au-dessous de la zone altérée (WZ)), on fore au moins un puits soit au-dessous de chacune des sources ou au  
15 voisinage immédiat de chacune d'elles. Dans chacun des puits ainsi forés, on descend une antenne constituée d'une pluralité de récepteurs sismiques (géophones, hydrophone, etc.) que l'on couple avec la formation environnante. Avec ce dispositif, on réalise des cycles d'émission-réception avec émission d'ondes sismiques dans la formation par au moins une source et acquisition des signaux captés par les récepteurs sismiques, en réponse aux ondes  
20 renvoyées par la formation. Les récepteurs peuvent par exemple être associés avec un tube de transfert de fluides descendu dans le puits, dans le but de relier une zone souterraine à un appareil d'exploitation en surface et couplés avec la formation environnant le puits.

Les différentes sources du dispositif de surveillance sismique peuvent être actionnées successivement, en ménageant entre les déclenchements un intervalle de temps  
25 suffisant pour recevoir les ondes renvoyées par la zone investiguée. On peut aussi utiliser plusieurs sources sismiques émettant les mêmes signaux que l'on déclenche simultanément pour augmenter la puissance émise.

Par le brevet FR 2.805.051 des demandeurs, on connaît une méthode et un système de surveillance sismique d'une formation souterraine. Comme schématisés aux Fig.1 à 4, le  
30 système comporte par exemple un réseau d'antennes sismiques 2 constituées chacune d'un ensemble de capteurs sismiques 4 disposés à intervalles réguliers le long d'un puits 3 foré

dans le sol. Ce réseau peut être régulier comme schématisé sur la Fig.2, ou irrégulier. Les capteurs sont par exemple des géophones mono-directionnels orientés verticalement ou multi-axes (triphones) et/ou des hydrophones. A proximité de chaque antenne 2, est disposée une source sismique 5. Comme sources, on utilise avantageusement des vibreurs de type piézoélectrique, tels que décrit dans le brevet FR 2.791.780 (US 6.338.394) aux noms conjoints des demandeurs, qui sont installés à demeure au voisinage immédiat de chaque antenne 2. A chaque antenne peut être associé un module électronique de contrôle et d'enregistrement 6 (Fig.1). Ces modules électroniques 6 peuvent être reliés à un laboratoire central de commande et de synchronisation 8. Suivant un autre mode de mise en œuvre, schématisé sur la figure 4, les antennes 2 sont reliées directement à un laboratoire central 8 regroupant tous les modules électroniques individuels de contrôle et d'enregistrement 6 (Fig.1).

Des ondes sismiques sont émises dans la formation souterraine par une ou plusieurs sources sismiques (vibrateurs) 5. Dans le cas de sources multiples, celles-ci émettent simultanément ; elles sont pilotées par des signaux orthogonaux les uns relativement aux autres, de manière à former un signal vibratoire composite. Les vibreurs fonctionnent en permanence ou tout du moins sur une durée assez longue pour obtenir un rapport signal au bruit suffisant. Les ondes sismiques générées par les sources sismiques 5 se propagent vers le bas (ondes descendantes 9). Ces ondes incidentes sont tout d'abord enregistrées par les récepteurs 4 de chaque puits 3. Les ondes renvoyées par les discontinuités de la zone (interfaces sismiques) se propagent vers le haut. Ces ondes montantes 10 sont enregistrées aussi par les différents récepteurs 4. De la sorte, les ondes montantes et descendantes sont superposées sur les sismogrammes. On applique aux enregistrements les traitements usuels bien connus des gens de l'art convenant à ceux obtenus par la technique dite de PSV (Profils Sismiques Verticaux). Ensuite, on discrimine les contributions respectives des sources sismiques au signal vibratoire composite et on reconstruit les sismogrammes équivalents à ceux que l'on obtiendrait en actionnant séparément les sources sismiques. Comme signaux orthogonaux, on utilise par exemple des signaux sinusoïdaux de fréquences différentes les uns des autres aussi bien par leurs composantes fondamentales que par leurs harmoniques respectives, ou des signaux formés à base d'ondelettes, de polynômes de Legendre ou de séries aléatoires, etc.

Dans le cas notamment où les signaux orthogonaux émis sont des sinusoïdes, on réalise par exemple la discrimination des contributions respectives des sources sismiques, par détermination de l'amplitude et de la phase du signal vibratoire composite aux fréquences fondamentales des signaux de pilotage appliqués aux sources sismiques. Cette discrimination comporte par exemple une pondération des signaux enregistrés par un facteur de pondération (ou d'apodisation) en cloche et une détermination de l'amplitude et de la phase du signal composite, ou bien encore une sélection par transformée de Fourier, de raies du spectre complexe associées respectivement aux différents signaux pondérés. La reconstruction des sismogrammes correspondant spécifiquement aux différentes sources sismiques est effectuée par exemple en appliquant, après leur séparation, une transformée de Fourier inverse, aux raies associées respectivement aux différents signaux pondérés.

Par ailleurs, il est connu que l'exploitation des réservoirs induit des variations de contraintes mécaniques dans le réservoir et dans sa couverture. Ces variations de contrainte ont pour effet de générer des signaux sismiques se propageant dans les terrains. Les récepteurs des différentes antennes 2 vont enregistrer ces signaux (ondes montantes 11).

Comme les sources sismiques 5 sont situées beaucoup plus près des récepteurs 4 des antennes 2 que du réservoir et que l'énergie qu'elles émettent est bien plus intense que l'énergie des signaux microsismiques induits générés dans le réservoir, il en résulte que les signaux microsismiques sont généralement masqués et indécélables.

## **La méthode selon l'invention**

La méthode selon l'invention permet de séparer des signaux de microsismicité induite et des signaux sismiques multi-sources dans le cadre d'opérations de la surveillance d'une zone souterraine en cours d'exploitation.

Elle comporte l'émission d'ondes sismiques dans la formation en couplant avec elle une ou plusieurs sources sismiques. Dans ce dernier cas, celles-ci émettent simultanément des signaux orthogonaux les uns relativement aux autres, de manière à former un signal vibratoire composite, la réception des signaux renvoyés par la formation en réponse à l'émission des ondes sismiques, l'enregistrement des signaux reçus par au moins un capteur sismique et le traitement des signaux enregistrés pour séparer les contributions

respectives des sources sismiques aux signaux reçus et reconstruire les sismogrammes équivalents à ceux que l'on obtiendrait en actionnant séparément les sources sismiques.

On sépare les signaux de microsismicité induite (sismique passive) des signaux sismiques émis essentiellement en isolant la contribution de chacune des sources par  
5 comparaison avec un modèle spectral de référence aux fréquences fondamentales émises et à leurs harmoniques respectives, et en reconstituant dans le domaine des temps les signaux de microsismicité induite et les signaux sismiques émis.

La contribution spectrale des signaux de microsismicité au spectre des signaux reçus est obtenue par exemple en retranchant les valeurs d'amplitude et de phase associées  
10 au modèle spectral de référence, de l'amplitude et de la phase du spectre associé aux enregistrements.

Suivant un mode de mise en œuvre, comme modèle spectral de référence, on utilise par exemple un modèle courant formé par mise à jour d'un modèle spectral prenant en compte la contribution de cycles d'enregistrement précédents.

15 Le modèle spectral courant peut être formé, en déterminant une valeur moyenne des spectres de fréquence formés à partir d'enregistrements (antérieurs et/ou postérieurs) obtenus pour la même source et les mêmes fréquences.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on forme le modèle spectral courant, en déterminant une valeur médiane des spectres de fréquence formés à partir d'enregistrements  
20 antérieurs obtenus pour la même source et les mêmes fréquences.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on forme le modèle spectral courant, par extrapolation ou interpolation à partir du spectre de fréquence à partir de valeurs spectrales voisines.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on forme le modèle spectral courant en  
25 utilisant la raie obtenue à cette fréquence.

Suivant un mode de mise en œuvre, la discrimination de signaux de microsismicité induite parmi des signaux émis dans le cadre d'opérations de surveillance sismique active est obtenue par les étapes suivantes :

a) pour chaque enregistrement n d'un cycle p d'enregistrement, on calcule les contributions respectives des différentes sources aux fréquences fondamentales ;

b) on calcule ensuite le rapport de la contribution à un modèle spectral courant formé par actualisation d'un modèle spectral précédent à partir de fréquences émises durant  
5 l'enregistrement précédent ainsi que de leurs harmoniques ;

c) on déduit la partie de l'enregistrement n du cycle p, que l'on peut associer aux opérations de surveillance sismique active ;

d) on déduit la partie de l'enregistrement n du cycle p, relevant proprement de l'activité microsismique passive ; et

10 e) on forme par inversion dans le domaine des temps, des contributions spectrales respectives de chacun des sources sismiques aux fréquences fondamentales et à leurs harmoniques, après complétion d'un cycle de mesures, les sismogrammes que l'on peut associer aux opérations de surveillance sismique active ; et

f) on forme par inversion dans le domaine des temps, à partir de la partie relevant  
15 de l'activité microsismique passive, les signaux microsismiques sous-jacents contenus dans les enregistrements.

La contribution spectrale est obtenue en multipliant une fonction de transfert entre une ondelette caractéristique de la source et un sismogramme associé à un récepteur donné, par une ondelette caractéristique de la source. Cette fonction de transfert peut être  
20 continuellement mise à jour au cours d'un cycle courant à partir d'une estimation faite au cours d'un cycle précédent et d'une estimation initiale faite au cours du cycle courant par la relation.

### **Présentation sommaire des figures**

Les caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront plus  
25 clairement à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de mise en oeuvre, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre schématiquement le dispositif de surveillance mis en place sur le terrain pour surveiller sismiquement une formation souterraine ;



- la Fig.2 montre un mode de disposition des unités d'émission-réception sur le terrain ;
  - la Fig.3 montre schématiquement une de ces unités d'émission-réception comprenant une source sismique et une antenne de réception ;
  - la Fig.4 montre une variante du dispositif de surveillance de la Fig.1 ; et
- 5 - la Fig.5 montre des exemples de signaux et spectres de fréquence mentionnés dans le cours de la description.

### Description détaillée

La méthode permet donc de réaliser des opérations de surveillance sismique d'une zone souterraine en utilisant un ensemble de capteurs sismiques et une ou plusieurs sources sismiques vibratoires. Dans le cas d'utilisation de plusieurs sources simultanées, celles-ci sont actionnées simultanément par des signaux à des fréquences différentes choisies de façon que l'on puisse discriminer les contributions de chaque source sur les sismogrammes obtenus à partir des signaux reçus et enregistrés.

Ceci est réalisé d'une façon générale par le pilotage des différentes sources par des sinusoïdes de fréquences différentes et par utilisation de techniques de calcul numérique connues telles que la transformée de Fourier inverse pour séparer les contributions aux sismogrammes obtenus des différentes sources sismiques.

La distorsion ne peut être négligée avec des sources mécaniques. En même temps qu'une fréquence  $f_i$ , une même source  $S_i$  émet les fréquences  $2f_i$ ,  $3f_i$  ...  $nf_i$ . En conséquence, si  $f_i$  et  $f_j$  sont les fréquences respectives des deux sources  $S_i$  et  $S_j$  de l'ensemble de sources, il convient si on veut séparer leurs contributions respectives non seulement que  $f_i \neq f_j$  mais aussi que  $f_i \neq 2f_j$ ,  $f_i \neq 3f_j$ , ...  $f_i \neq nf_j$ .

Comme déjà décrit dans le brevet FR 2.805.051 précité, si on émet le signal composite  $P_t$  constitué de la somme de  $N$  sinusoïdes  $\{f_i, A_i, \Phi_i\}$  avec  $1 \leq i \leq N$ , toutes les fréquences étant contenues dans une bande spectrale comprise entre deux fréquences limites  $f_b$  et  $f_t$ , le sismogramme  $T_t$  observé au point  $R$  aura pour transformée de Fourier à la fréquence  $f_i$ , le nombre de module  $A_i$  et de phase  $\Phi_i$  égaux à l'amplitude et à la phase de

la sinusoïde  $T_i$ . On peut ainsi, en émettant successivement toutes les sinusoïdes de fréquences  $f_b$  à  $f_f$ , reconstruire par transformée de Fourier inverse le sismogramme  $T_i$ .

Dans le cas où, par exemple, toutes les amplitudes  $A_i$  sont égales à 1 et toutes les phases  $\Phi_i$  sont nulles, le signal  $P_i$  obtenu est très proche de celui résultant de l'auto-corrélation d'un signal à fréquence glissante variant dans l'intervalle  $[f_b - f_f]$  (sweep), utilisé couramment en vibrosismique. D'après la théorie de la transformée de Fourier discrète, bien connue des gens de l'art, si l'on désire écouter la source  $S_1$  pendant le temps  $t_e$ , l'incrément de fréquence entre les sinusoïdes est  $\Delta f = 1/t_e$  et le nombre de sinusoïdes nécessaires est  $N_f = (f_f - f_b)t_e$ .

On peut donc exciter simultanément  $N$  vibrateurs  $S_1, S_2, S_i, \dots, S_N$  installés sur le terrain au moyen de signaux vibratoires de fréquences telles que chaque source est excitée successivement par chacune des  $N_f$  sinusoïdes ci-dessus à chaque instant, sous réserve que les fréquences respectives des sinusoïdes émises à un même instant par les différentes sources sismiques sont toutes différentes les unes des autres. On réalise ainsi avec chaque vibrateur  $N_f$  enregistrements correspondant aux  $N_f$  fréquences sélectionnées dans l'intervalle de balayage. La séparation des signaux reçus par les capteurs sur le terrain, en réponse à l'émission simultanée des différents signaux est ainsi obtenue par sélection de la raie à la fréquence appropriée.

On répète ainsi des cycles de  $N_f$  enregistrements. L'enregistrement  $E_n$  d'un cycle d'acquisition donné contient un ensemble de fréquences fondamentales et harmoniques qui ne dépend que de  $n$ . Partant de cette observation, la méthode que l'on va appliquer pour détecter les effets de la microsismicité, repose sur le constat vérifié dans la pratique, que les variations d'amplitude et de phase observées à la fréquence  $f$  et à l'instant  $t$  sont très peu différentes de celles observées à la fréquence  $f - \Delta f$  et à l'instant  $t - \Delta t$ . Cela permet de former un modèle spectral cumulatif construit à partir d'enregistrements de cycles précédents aux mêmes fréquences mais formé donc sur un temps long pendant lequel les caractéristiques des signaux sismiques émis sont susceptibles de varier, et adapté en permanence à partir d'enregistrements obtenus pendant une période suffisamment courte pour que les variations de signal puissent être négligées. L'efficacité de la méthode proposée est optimale quand les fréquences successives émises par une même source

s'incrémentent régulièrement. On pourra, par exemple, alterner des cycles en fréquences montantes et en fréquences descendantes.

Pour parvenir dans la pratique à la mise en évidence de cette contribution spectrale des signaux microsismiques sous-jacents, on va procéder comme suit.

5           Notations :

- $f_{i,n}$ , va désigner la fréquence fondamentale émise par la source  $i$  pendant l'enregistrement  $n$  (cette fréquence est indépendante du cycle) ;

Pour simplifier les notations des grandeurs suivantes, l'indice désignant le numéro du récepteur est omis. Quel que soit celui-ci, les grandeurs sont calculées de la même manière.

- $R_{p,n}$  va désigner l'enregistrement de rang  $n$  du cycle  $p$  ;
- $C_{p,i,n}$ , la contribution de la source  $i$  à l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$  ;
- $M_{p,n}$ , le modèle initial de la partie active de l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$ . Ce modèle ne contient que les fréquences émises ainsi que leurs harmoniques pendant l'enregistrement  $n$  ;
- $E_{p,n}$ , le rapport entre les contributions actives de l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$  et le modèle initial de la partie active de l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$  ;
- $A_{p,n}$ , la partie active de l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$  ;
- $P_{p,n}$ , la partie passive de l'enregistrement  $n$  du cycle  $p$  (microsismique) ;
- $k$  le coefficient d'actualisation des écarts (typiquement de l'ordre de 15 à 25%) ;
- $h$  le coefficient d'actualisation des modèles (typiquement de l'ordre de 5 à 10%).

Compte tenu de ces notations, la méthode consiste dans un premier temps, pour chaque enregistrement  $n$  du cycle  $p$ , au calcul des contributions respectives  $C_{p,i,n}$  des différentes sources aux fréquences fondamentales ainsi qu'à leurs harmoniques par la méthode décrite dans le brevet FR 2.805.051 précité. Du fait de la présence éventuelle

d'énergie microsismique, la contribution des différentes sources est susceptible d'être bruitée.

On peut améliorer cette estimation en associant les contributions de tous les récepteurs d'un même enregistrement  $C_{p,i,n}$ . Ces contributions peuvent être considérées  
5 comme le produit de deux facteurs dont l'un ne dépend que de la source (et non du récepteur) et l'autre du récepteur et non de la source.

Si l'indice  $r$  représente le récepteur,

$$C_{p,i,n,r} = S_{p,i,n} T_{p,i,n,r}$$

$T$  ne dépend de  $p$ ,  $i$  et  $n$  que par la variation des caractéristiques du récepteur et de  
10 son environnement avec le temps. Ces variations sont très lentes et peuvent être négligées ou estimées de façon plus précise.

$S$  et  $T$  sont déterminés à un facteur près. On peut ainsi choisir pour  $S_{p,i,n}$  la moyenne des ondes descendantes. Cette moyenne est obtenue par un calcul bien connu de ceux qui traitent les PSV (mise à plat des ondes descendantes et moyenne). Les  $T_{p,i,n,r}$  sont alors les  
15 fonctions de transfert entre l'onde descendante et le sismogramme.

Dans le cas où l'on désire prendre en compte la variation de  $T$ , on peut utiliser par exemple le coefficient d'actualisation  $h$  pour mettre à jour  $T_{p,i,n,r}$  à partir de  $T_{p,i,n-1,r}$  en procédant de la manière suivante :

Si  $Co_{p,i,n,r}$  désigne l'estimation initiale de la contribution  $C$  et  $To_{p,i,n,r}$ , celle du  
20 facteur récepteur, on calcule  $S$  par mise à plat et moyenne des ondes descendantes puis  $To_{p,i,n,r}$  par la relation :

$$To_{p,i,n,r} = \frac{Co_{p,i,n,r}}{S_{p,i,n}}$$

On obtient l'estimation finale du facteur récepteur par :

$$T_{p,i,n,r} = (1-h)T_{p,i,n-1,r} + hTo_{p,i,n,r}$$

25 et la contribution finale de la source  $i$  au cycle  $p$  de l'enregistrement  $n$  par :

$$C_{p,i,n,r} = S_{p,i,n} T_{p,i,n,r}$$

On calcule ensuite le rapport  $E_{p,n}$  de l'enregistrement courant au modèle spectral par la relation :

$$E_{p,n} = (1-k)E_{p,n-1} + k \frac{\sum C_{p,i,n}}{M_{p,n}}$$

- 5 Ce calcul nécessite la connaissance de  $M_{p,n}$  dont le calcul décrit ci-dessous est effectué lors du cycle p-1. Il comporte un lissage sur les fréquences précédentes de façon à limiter l'effet de l'énergie microsismique dans son estimation. La formule proposée n'utilise que les enregistrements précédents et autorise donc le temps réel. Dans les cas difficiles, on peut remplacer cette somme par une moyenne ou une médiane courante. Il faut alors travailler en temps différé (le temps nécessaire à réaliser la seconde moitié des enregistrements utilisés dans le calcul de la moyenne).

Si  $M_{p+1,n}$  représente le modèle initial de la partie active de l'enregistrement n du cycle p+1, alors :

$$M_{p+1,n} = (1-h)M_{p,n} + h \sum E_{p,n-1} C_{p,i,n-1}$$

- 15 Ce modèle consiste essentiellement en une moyenne pondérée de la contribution courante et des contributions précédentes. La formule utilisée autorise la variation du modèle : la contribution du cycle p-q au modèle utilisé pour le cycle p est multipliée par le coefficient  $(1-h)^q$  qui tend vers zéro d'autant plus vite que h est voisin de 1. Cela permet au modèle  $M_{p,n}$  de suivre les variations saisonnières, et aux rapports  $E_{p,n}$  de ne refléter que les variations journalières. c) Connaissant le modèle spectral  $M_{p,n}$  ainsi que le rapport  $E_{p,n}$  de la contribution au modèle précédemment établie, on en déduit la partie  $A_{p,n}$  de l'enregistrement n du cycle p, relevant de la sismique active Partie active :

$$A_{p,n} = M_{p,n} E_{p,n}$$

- De la même façon la partie  $P_{p,n}$  de l'enregistrement n du cycle p, relevant proprement de l'activité microsismique (passive) se calcule par la relation :

$$P_{p,n} = R_{p,n} - A_{p,n}$$

Les contributions spectrales respectives  $C_{p,i,n}$  de chacune des sources  $S_i$  aux fréquences fondamentales et à leurs harmoniques, après complétion d'un cycle de mesures fournissent par FFT inverse, les sismogrammes (dans le domaine des temps) utilisés dans le cadre de l'exploitation active.

- 5 Par FFT inverse, à partir de la partie  $P_{p,n}$  relevant de contributions passives, on obtient l'estimation de l'activité microsismique sous-jacente contenue dans l'enregistrement  $R_{p,n}$ .

La mise à jour du rapport  $E_{p,n}$  entre la contribution courante et le modèle spectral  $M_{p,n}$ , est effectuée de façon relativement rapide de façon à permettre des variations rapides  
10 du signal. La mise à jour du modèle initial s'effectue de façon beaucoup plus lente ; en fait le modèle initial pourrait ne pas être mis à jour.

L'intérêt de ces mises à jour est d'optimiser l'estimation du signal actif quand ses variations ne peuvent être contrôlées (variations saisonnières et journalières). Dans les cas les plus favorables, elles ne sont pas nécessaires et l'estimation de la partie active se  
15 réduira au modèle initial.

Une autre simplification possible est de négliger le bruit sismique aux fréquences émises (et, si besoin, aux harmoniques de ces fréquences). On ne se préoccupe plus d'estimer la partie active et on se contente, pour obtenir la partie passive, d'annuler ou d'interpoler les raies correspondant aux fréquences émises (et, s'il le faut, celles de leurs  
20 harmoniques).

Dans un premier temps, on supprime les raies harmoniques du spectre de fréquence de chaque signal enregistré et on interpole l'amplitude et la phase aux valeurs de raie à la fréquence de la source ; et puis on reconstitue par inversion l'enregistrement non affecté par les émissions des sources contenant éventuellement un signal microsismique. Ce mode  
25 de mise en œuvre convient plutôt dans le cas d'un nombre de sources peu élevé et/ou présentant une variabilité importante du signal avec le temps.

## REVENDICATIONS

1) Méthode de surveillance sismique active d'une formation souterraine (1) permettant une séparation de signaux de microsismicité induite de signaux sismiques émis  
5 dans le cadre d'opérations de surveillance sismique active d'une zone souterraine en cours d'exploitation, comportant la réalisation de cycles d'enregistrement sismique avec émission d'ondes sismiques dans la formation en couplant avec elle une ou plusieurs sources sismiques (5) qui, dans ce cas, émettent simultanément des signaux orthogonaux les uns relativement aux autres, de manière à former un signal vibratoire composite, réception des  
10 signaux renvoyés par la formation en réponse à l'émission des ondes sismiques, enregistrement des signaux reçus par au moins un capteur sismique (2) et traitement des signaux enregistrés pour séparer les contributions respectives des sources sismiques aux signaux reçus et reconstruire les sismogrammes équivalents à ceux que l'on obtiendrait en actionnant séparément les sources sismiques, caractérisée en ce que l'on sépare sur les  
15 enregistrements les signaux de microsismicité induite des signaux sismiques résultant des opérations de surveillance active, en isolant leur contribution par comparaison avec un modèle spectral de référence en tenant compte des contributions spectrales de chaque source ( $S_i$ ) aux fréquences fondamentales émises et à leurs harmoniques respectives, et en reconstituant par inversion dans le domaine des temps les signaux de microsismicité.

20 2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que la contribution spectrale des signaux de microsismicité au spectre des signaux reçus est obtenue en retranchant les valeurs d'amplitude et de phase associées au modèle spectral de référence, de l'amplitude et de la phase du spectre associé aux enregistrements.

3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que le modèle spectral  
25 de référence est un modèle courant formé par mise à jour d'un modèle spectral précédent en tenant compte de la contribution spectrale de cycles d'enregistrement précédents.

4) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on forme le modèle spectral courant en déterminant une valeur moyenne des spectres de fréquence formés à partir d'enregistrements antérieurs et/ou postérieurs obtenus pour la  
30 même source et les mêmes fréquences.

5) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on forme le modèle spectral courant en déterminant une valeur médiane des spectres de fréquence formés à partir d'enregistrements antérieurs et/ou postérieurs obtenus pour la même source et les mêmes fréquences.

5 6) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on forme le modèle spectral courant par extrapolation ou interpolation à partir du spectre de fréquence à partir de valeurs spectrales voisines.

7) Méthode de surveillance sismique active d'une formation souterraine permettant une discrimination de signaux de microsismicité induite parmi des signaux émis dans le cadre d'opérations de surveillance sismique active d'une zone souterraine en cours d'exploitation, comportant la réalisation de cycles d'enregistrement sismique avec émission d'ondes sismiques dans la formation en couplant avec elle N sources sismiques ( $S_i$ ) émettant simultanément et pilotés par des signaux orthogonaux les uns relativement aux autres, de manière à former un signal vibratoire composite, réception des signaux renvoyés par la formation en réponse à l'émission des ondes sismiques, enregistrement des signaux reçus par des moyens de réception sismique et traitement des signaux enregistrés pour séparer les contributions respectives des sources sismiques aux signaux reçus et reconstruire les sismogrammes équivalents à ceux que l'on obtiendrait en actionnant séparément les sources sismiques, caractérisée en ce qu'elle comporte les étapes suivantes :

20 a) pour chaque enregistrement n d'un cycle p d'enregistrement, on calcule les contributions respectives ( $C_{p,i,n}$ ) des différentes sources aux fréquences fondamentales ;

b) on calcule ensuite le rapport ( $E_{p,n}$ ) de la contribution à un modèle spectral ( $M_{p,n}$ ) courant formé par actualisation d'un modèle spectral précédent ( $M_{p,n-1}$ ) à partir de fréquences émises durant l'enregistrement (n-1) précédent ainsi que de leurs harmoniques ;

25 c) on déduit la partie ( $A_{p,n}$ ) de l'enregistrement n du cycle p, que l'on peut associer aux opérations de surveillance sismique active ;

d) on déduit la partie ( $P_{p,n}$ ) de l'enregistrement n du cycle p, relevant proprement de l'activité microsismique passive ; et



e) on forme par inversion dans le domaine des temps, des contributions spectrales respectives ( $C_{p,i,n}$ ) de chacun des sources sismiques ( $S_i$ ) aux fréquences fondamentales et à leurs harmoniques, après complétion d'un cycle de mesures, les sismogrammes que l'on peut associer aux opérations de surveillance sismique active ; et

5 f) on forme par inversion dans le domaine des temps, à partir de la partie ( $P_{p,n}$ ) relevant de l'activité microsismique passive, les signaux microsismiques sous-jacents contenus dans les enregistrements.

8) Méthode selon la revendication 7, caractérisée en ce que la contribution spectrale ( $C_{p,i,n}$ ) est obtenue en multipliant une fonction de transfert ( $T_{p,i,n,r}$ ) entre une ondelette caractéristique de la source et un sismogramme associé au récepteur r, par une ondelette caractéristique de la source.

9) Méthode selon la revendication 8, caractérisée en ce que l'on met continuellement à jour la dite fonction de transfert.

10) Méthode selon la revendication 9, caractérisée en ce que la mise à jour de la dite  
15 fonction de transfert ( $T_{p,i,n,r}$ ) est obtenue au cours d'un cycle courant à partir d'une estimation ( $T_{p,i,n-1,r}$ ) faite au cours d'un cycle précédent et d'une estimation initiale ( $To_{p,i,n,r}$ ) faite au cours du cycle courant par la relation :

$$T_{p,i,n,r} = (1 - h)T_{p,i,n-1,r} + hTo_{p,i,n,r}$$

1/3

FIG.1

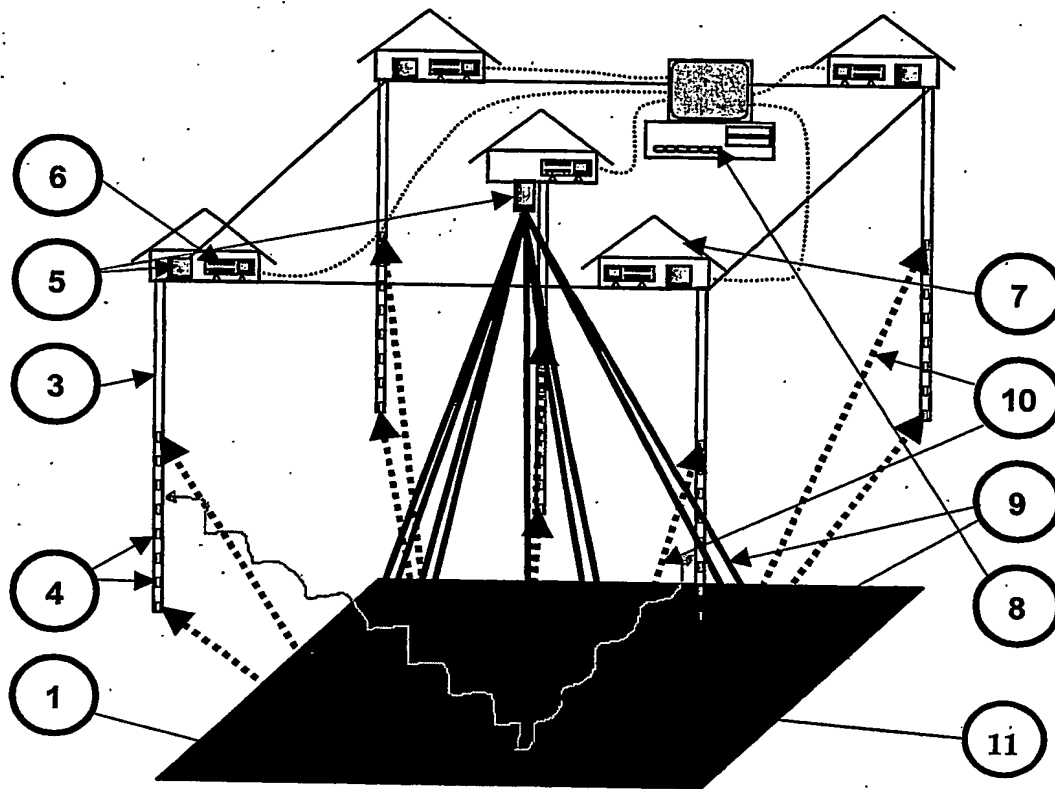
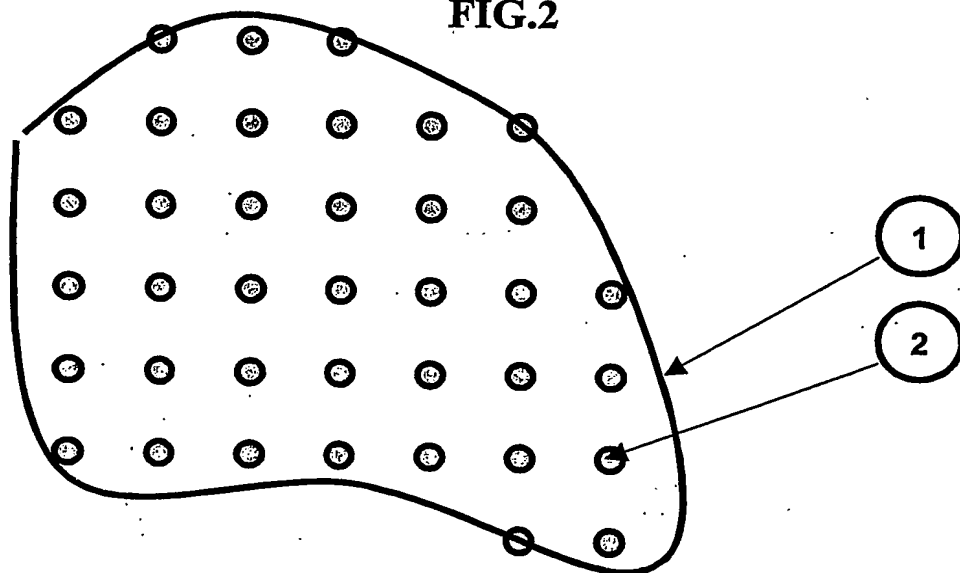
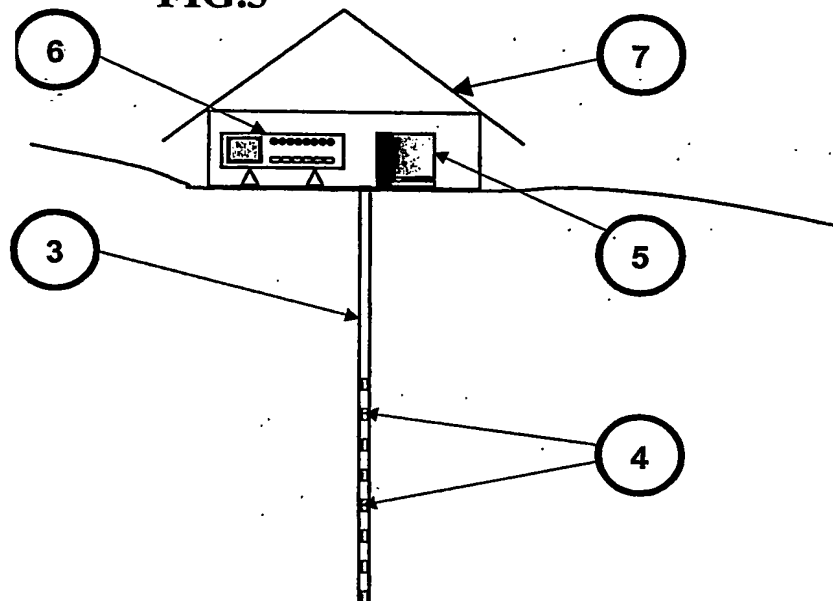


FIG.2



**FIG.3**



**FIG.4**

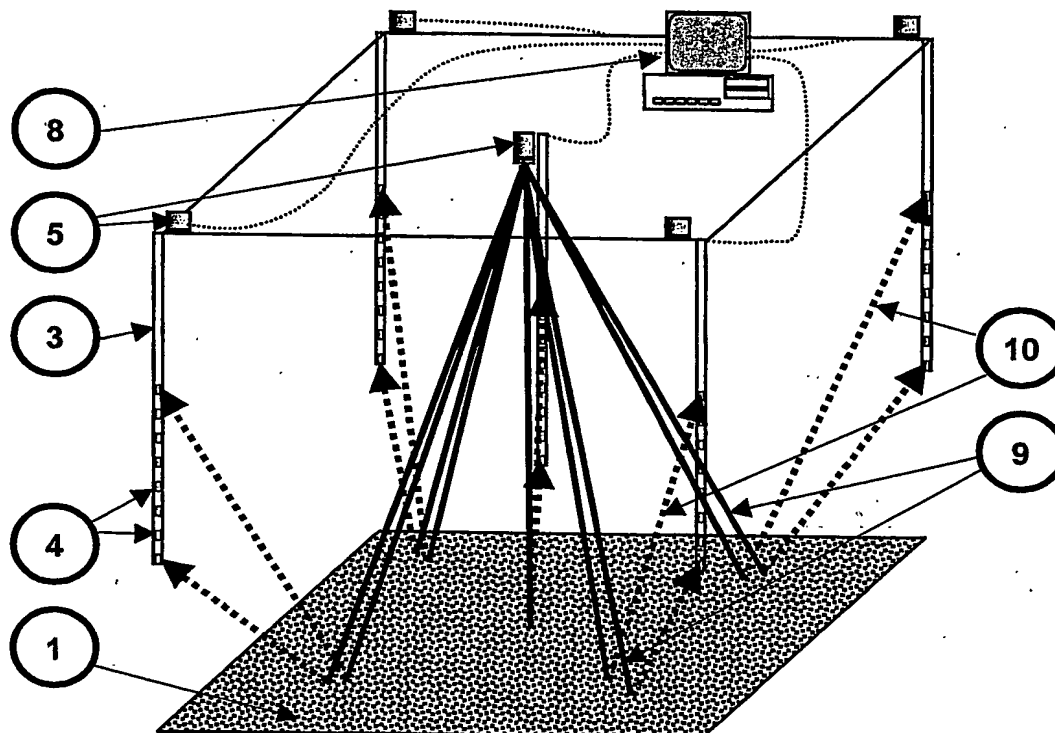
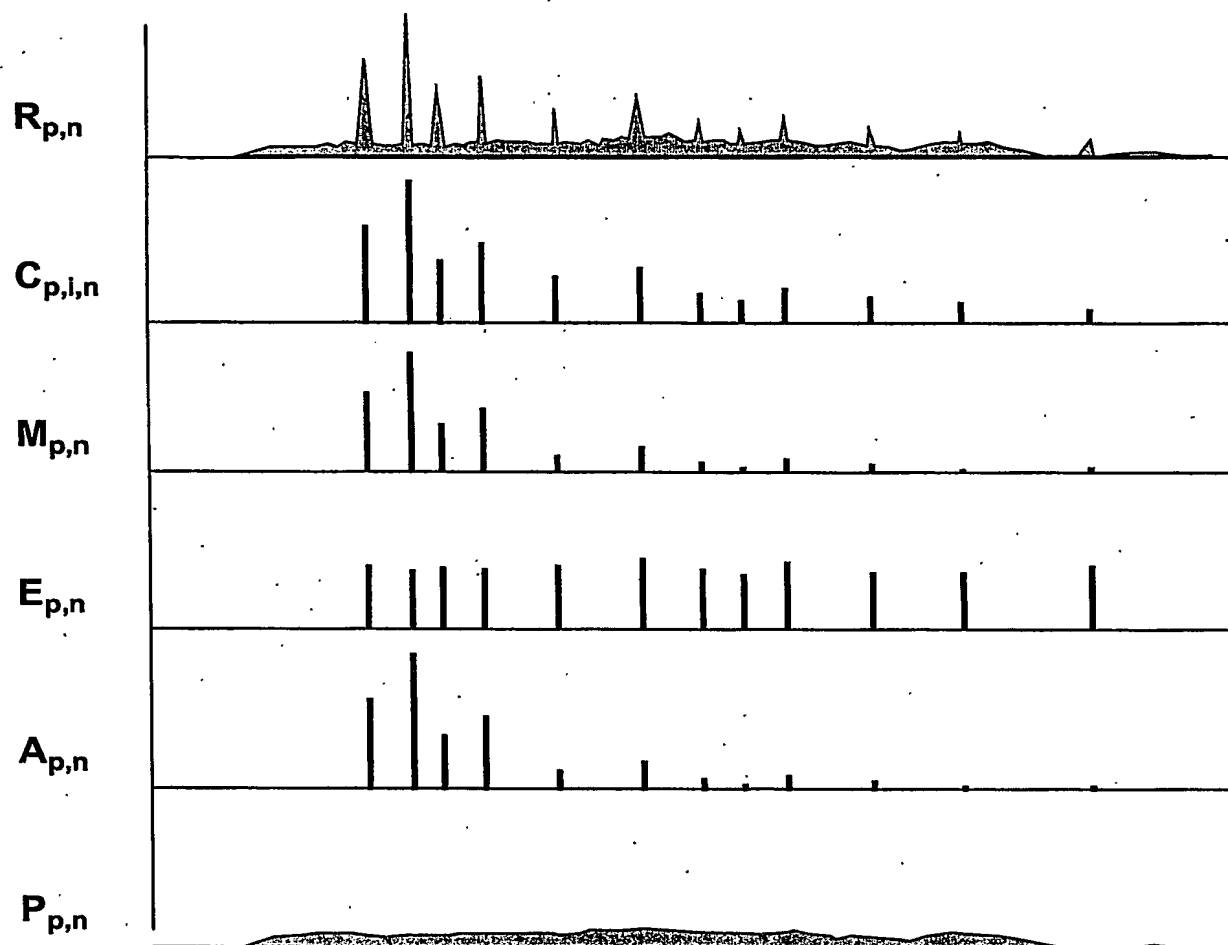


FIG.5



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter. application No  
PC171R 03/02874

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
IPC 7 G01V1/28

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)  
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 6 442 489 B1 (SOKOLIN HAIM ET AL) 27 August 2002 (2002-08-27) column 3, line 31 - line 48 column 4, line 40 - line 54 column 5, line 37 - column 6, line 25	1
Y	FR 2 805 051 A (GEOPHYSIQUE CIE GLE) 17 August 2001 (2001-08-17) cited in the application claim 1	1
A	US 5 377 104 A (SORRELLS GORDON G ET AL) 27 December 1994 (1994-12-27) abstract	1,7
A	US 6 049 508 A (DEFLANDRE JEAN-PIERRE) 11 April 2000 (2000-04-11) claim 1	1,7

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 February 2004

Date of mailing of the international search report

26/02/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Lorne, B

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter-Application No  
PCT/JP03/02874

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6442489	B1	27-08-2002	NONE
FR 2805051	A	17-08-2001	FR 2805051 A1 17-08-2001
		BR 0104488 A	08-01-2002
		CA 2366550 A1	16-08-2001
		CN 1363046 T	07-08-2002
		CZ 20013702 A3	13-02-2002
		EA 3029 B1	26-12-2002
		EP 1173781 A1	23-01-2002
		WO 0159481 A1	16-08-2001
		HU 0202591 A2	28-11-2002
		JP 2003522956 T	29-07-2003
		NO 20014972 A	12-12-2001
		PL 350336 A1	02-12-2002
		SK 16312001 A3	02-07-2002
		US 2002191490 A1	19-12-2002
US 5377104	A	27-12-1994	NONE
US 6049508	A	11-04-2000	FR 2772137 A1 11-06-1999
		BR 9805239 A	03-11-1999
		CA 2253764 A1	08-06-1999
		DE 69807826 D1	17-10-2002
		DE 69807826 T2	16-01-2003
		EP 0921416 A1	09-06-1999
		NO 985718 A	09-06-1999

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dem. internationale No  
PCT/FR 03/02874

## A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 G01V1/28

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

## B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01V

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX

## C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 6 442 489 B1 (SOKOLIN HAIM ET AL) 27 août 2002 (2002-08-27) colonne 3, ligne 31 - ligne 48 colonne 4, ligne 40 - ligne 54 colonne 5, ligne 37 -colonne 6, ligne 25	1
Y	FR 2 805 051 A (GEOPHYSIQUE CIE GLE) 17 août 2001 (2001-08-17) cité dans la demande revendication 1	1
A	US 5 377 104 A (SORRELLS GORDON G ET AL) 27 décembre 1994 (1994-12-27) abrégé	1,7
A	US 6 049 508 A (DEFLANDRE JEAN-PIERRE) 11 avril 2000 (2000-04-11) revendication 1	1,7

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

### \* Catégories spéciales de documents cités:

\*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

\*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

\*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

\*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

\*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

\*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

\*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

\*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

\*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

19 février 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

26/02/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Lorne, B

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Der. Internationale No  
PCT/FR 03/02874

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 6442489	B1	27-08-2002	AUCUN	
FR 2805051	A	17-08-2001	FR 2805051 A1	17-08-2001
			BR 0104488 A	08-01-2002
			CA 2366550 A1	16-08-2001
			CN 1363046 T	07-08-2002
			CZ 20013702 A3	13-02-2002
			EA 3029 B1	26-12-2002
			EP 1173781 A1	23-01-2002
			WO 0159481 A1	16-08-2001
			HU 0202591 A2	28-11-2002
			JP 2003522956 T	29-07-2003
			NO 20014972 A	12-12-2001
			PL 350336 A1	02-12-2002
			SK 16312001 A3	02-07-2002
			US 2002191490 A1	19-12-2002
US 5377104	A	27-12-1994	AUCUN	
US 6049508	A	11-04-2000	FR 2772137 A1	11-06-1999
			BR 9805239 A	03-11-1999
			CA 2253764 A1	08-06-1999
			DE 69807826 D1	17-10-2002
			DE 69807826 T2	16-01-2003
			EP 0921416 A1	09-06-1999
			NO 985718 A	09-06-1999